

# MDO : approche générique et enjeux

## Pistes pour une démarche outillée

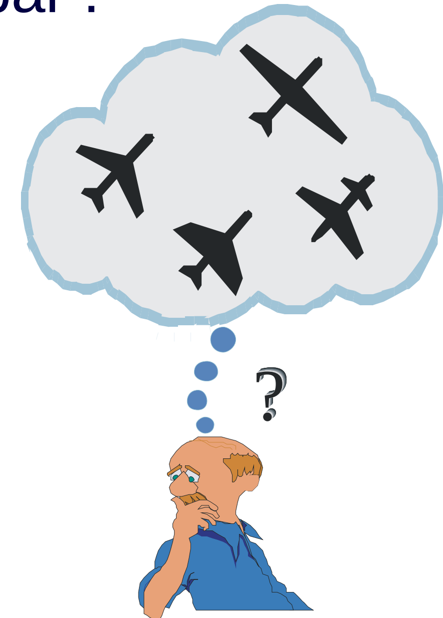
Sébastien Defoort, département DCPS




retour sur innovation

# Introduction

- Les systèmes aéronautiques se caractérisent par :
  - Des technologies avancées en évolution rapide
  - Un grand nombre de disciplines en jeu
  - Un spectre de missions variées
  - Une recherche de la performance optimale




- Pour chaque développement, le systémier est amené à se demander :
  - Quelles sont les configurations adaptées ?
  - Comment intégrer les technologies de rupture ?
  - Comment mener l'optimisation globale du système ?

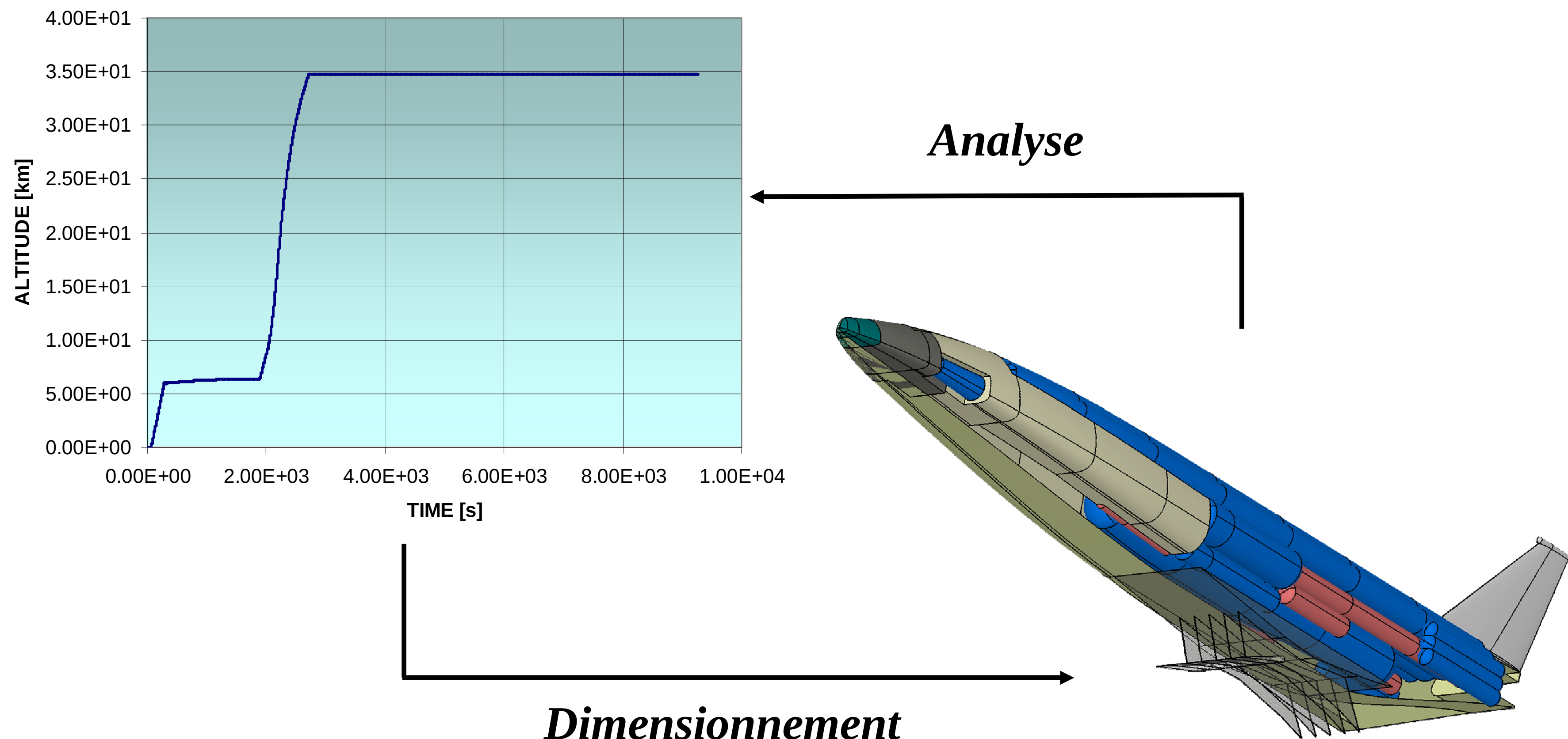
- Avec un objectif *in fine* : réduire le coût, la durée et améliorer l'efficacité des cycles de conception

# Plan de la présentation

- 1. La MDO : définition et périmètre
  - Principes et définitions, problématiques scientifiques associées,
- 2. Les étapes (illustrées) d'une approche MDO
  - La pose de problème
  - Son traitement : formulation et optimisation
  - Son exploitation : maîtrise de la connaissance, capitalisation
- 3. Principales avancées méthodologiques
  - Formalisation du processus, surfaces de réponse, formulations MDO, algorithmes d'optimisation, CAO paramétrique, incertitudes
- 4. Une vue partielle de l'état de l'art
  - Points durs et perspectives

# Position du problème de conception

- Etablir une relation entre un jeu de performance spécifié et une solution « instanciée »





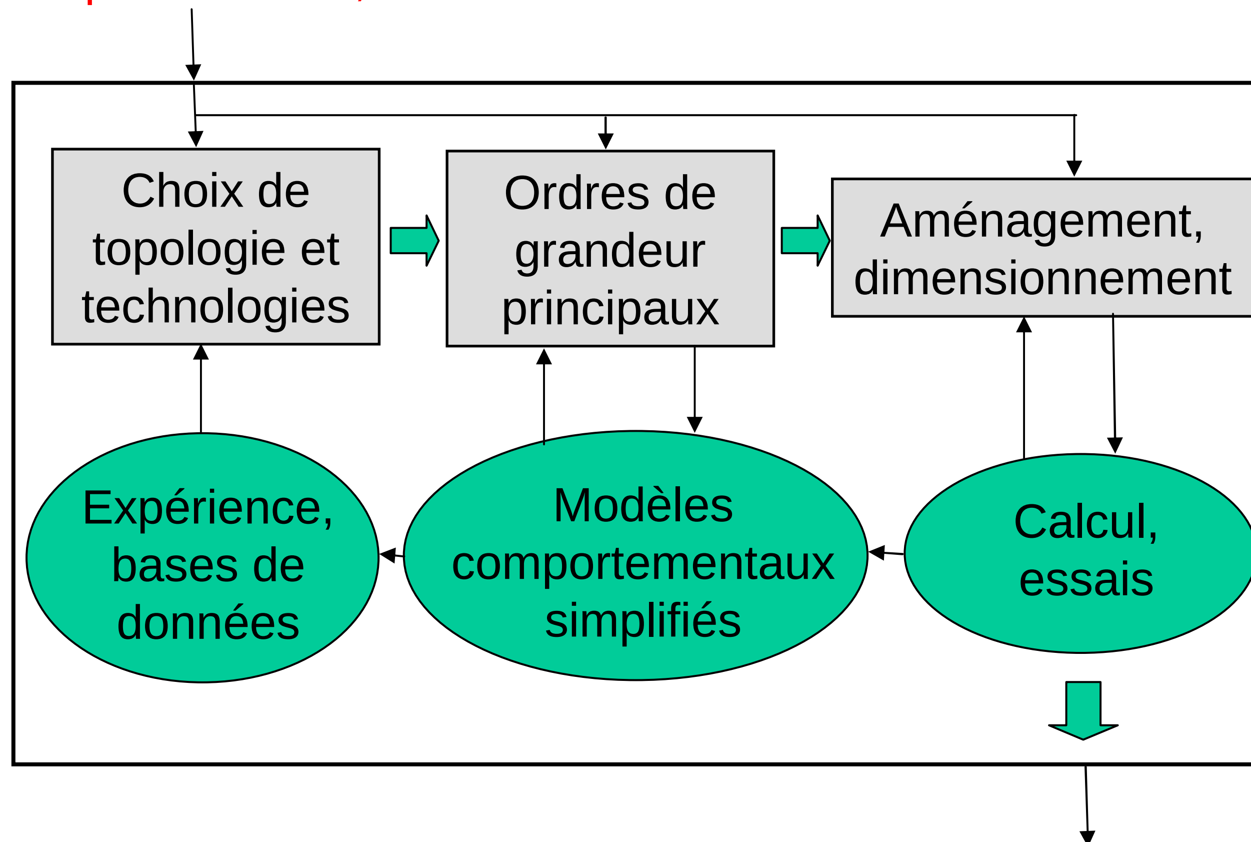
ONERA

# Position du problème de conception

- Les performances (opérationnelles) :
  - Elles caractérisent de façon globale ou partielle la mission spécifiée au système à concevoir. Elles comportent en général deux volets :
    - L'emport d'une charge utile (passagers, satellite, capteurs,…)
    - La réalisation d'une trajectoire avec des contraintes données (distance franchissable, autonomie, manoeuvrabilité, incrément de vitesse, précision,…)
  - D'autres notions définissent les performances des systèmes mais sont plus difficiles à modéliser :
    - La probabilité de succès, incluant la fiabilité, la disponibilité, la probabilité de pénétration des défenses,…
    - La notion de coût et ses multiples composantes : coût de possession, coût d'exploitation,…Souvent abordée au travers de la masse totale du système et du niveau technologique. Elle peut être étendue au coût environnemental (acoustique, émissions polluantes).
    - Les impératifs de fabrication : modes de construction et d'assemblage, maintenabilité,…

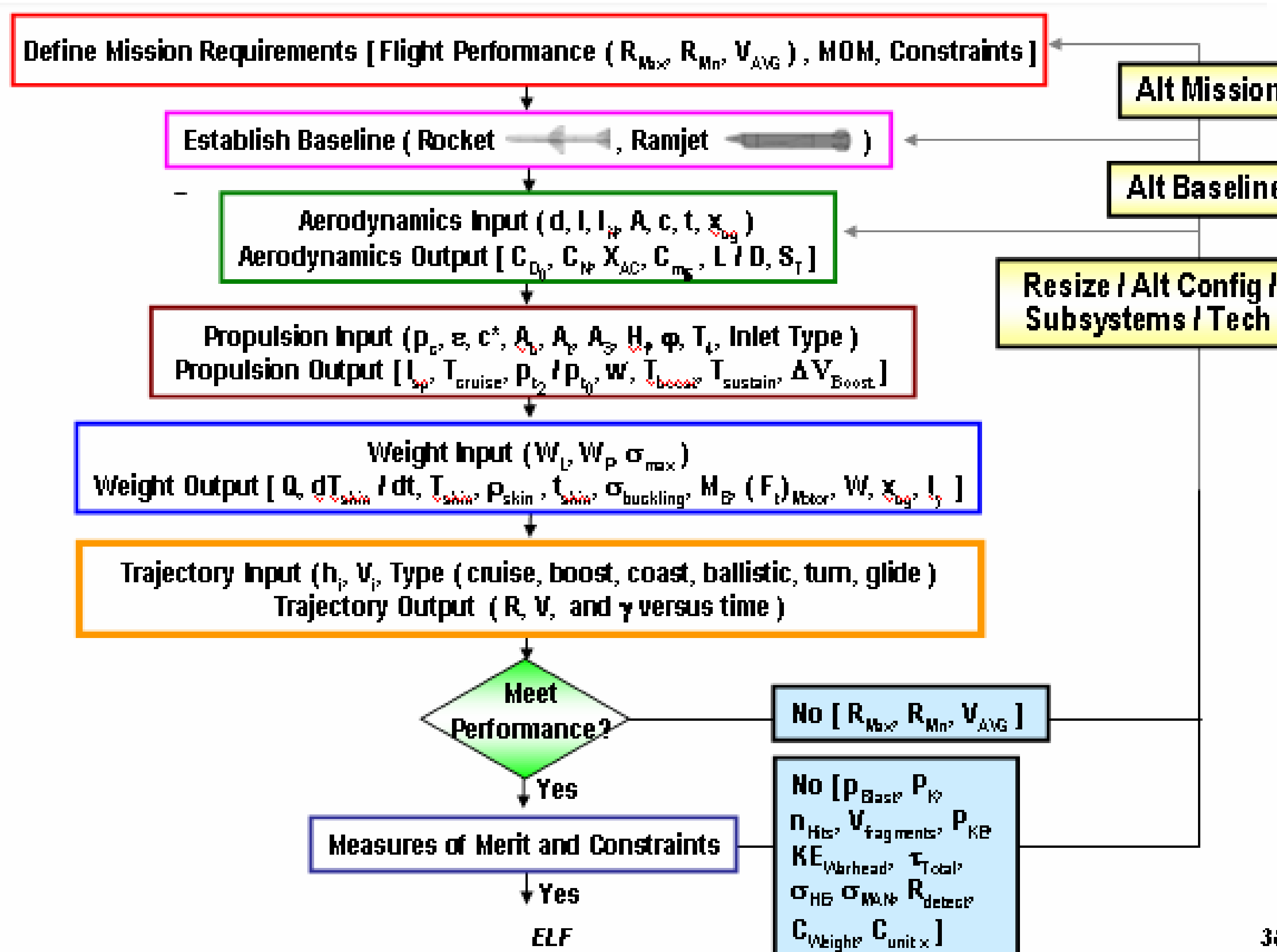
# Position du problème de conception

- Les étapes du processus : approche classique



# Position du problème de conception

- Les étapes du processus : approche classique



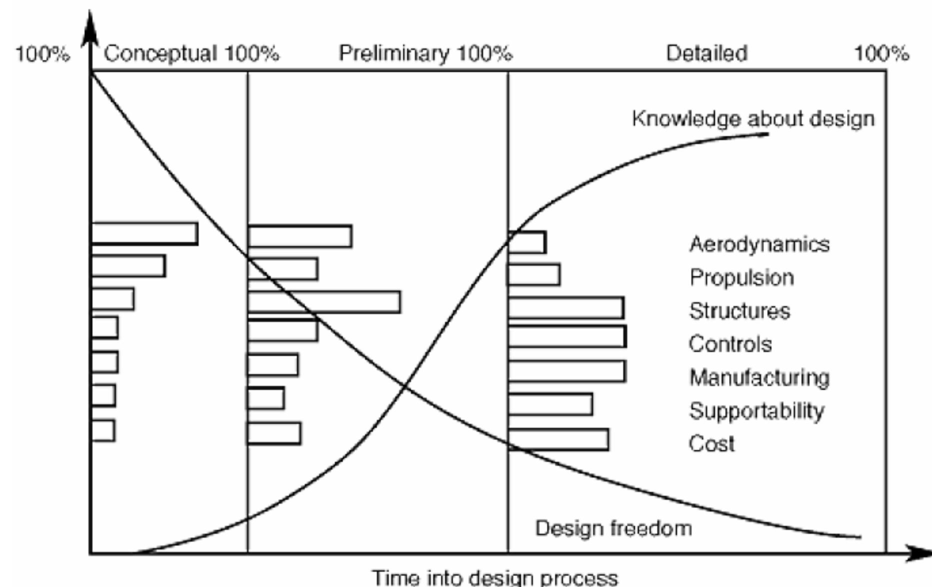


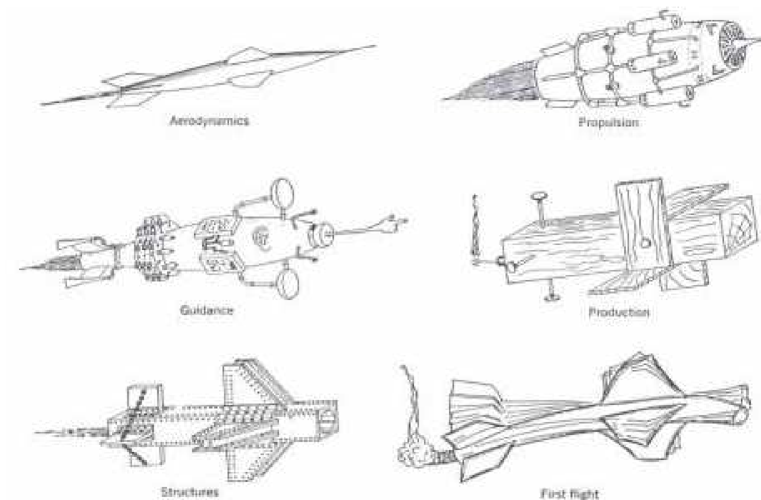

ONERA

# La MDO : définition et thématiques associées

- Les concepts de « Concurrent Engineering » et de MDO apparaissent :
  - Avec le développement des méthodes numériques
  - Avec la nécessité de prendre en compte les notions de fiabilité, maintenance, industrialisation dès le début du processus
  - Avec le partage international de la conception

- Constat : limites du processus traditionnel
  - Beaucoup de choix figés en phase d'étude conceptuelle
  - Une suite d'optimisations disciplinaires ne menant pas forcément à l'optimum global



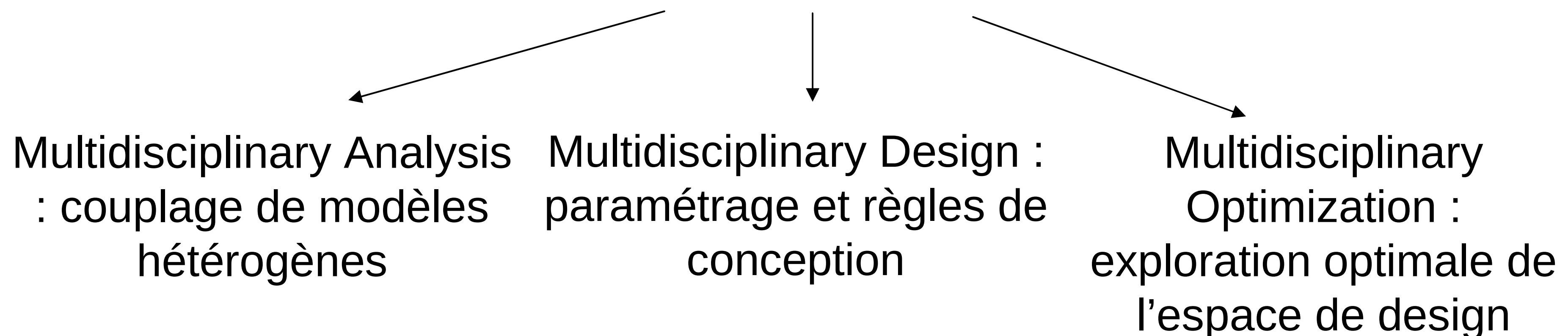


ONERA

# La MDO : définition et thématiques associées

- La MDO : une méthodologie de conception intégrée
  - Permettant de modéliser et de tirer parti des interactions disciplinaires
  - Ayant pour but d'introduire davantage de connaissance en amont
  - Fournissant des éléments de décision aux ingénieurs système

- Une tentative de définition :




  - Ne se réduit pas à l'algorithmie d'optimisation
  - N'est pas un outil « presse-bouton » sans intervention humaine

# La MDO : définition et thématiques associées

- Les thématiques de recherche et développement associées

## Domaines scientifiques

### Analyse & approximation

- Intégration de codes fins (CFD, FEM)
- Techniques de réduction de modèles
- Modélisation multi-niveaux
- Géométrie paramétrée

### Formulation & optimisation

- Objectifs/contraintes
- Décomposition du processus
- Stratégie d'optimisation
- Sensibilité et incertitudes

## Infrastructure

### Intégration de processus

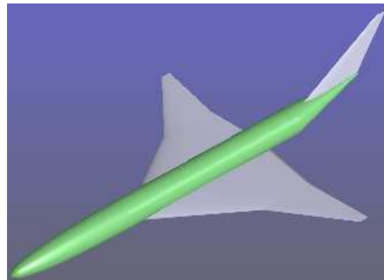
- Environnement MDO, boite à outils
- Infrastructure informatique distribuée
- BDD, formats d'échange
- Visualisation de l'espace de design

### Implémentation industrielle

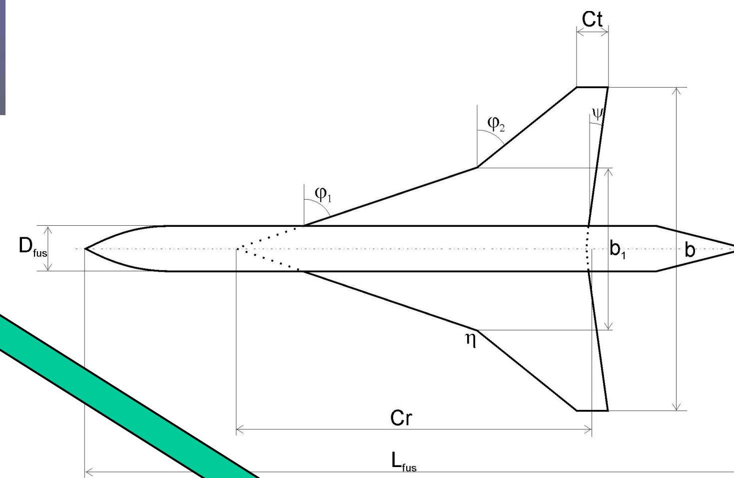
- Découpage organisationnel
- Système d'information projet
- Evaluation des coûts et gains
- Déploiement, formation

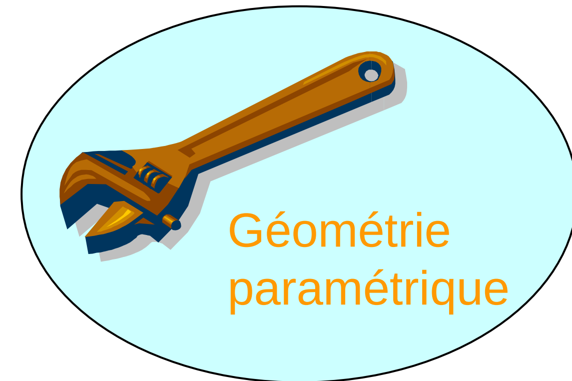
# La pose de problème

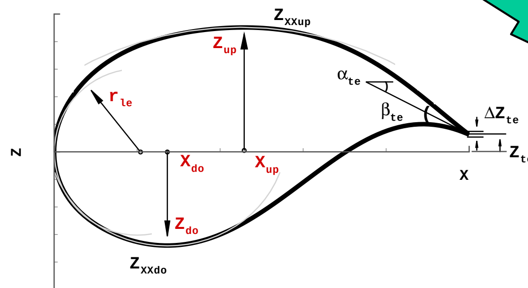
- Objectifs, contraintes, variables de design



$S, \lambda, V_{interne}$



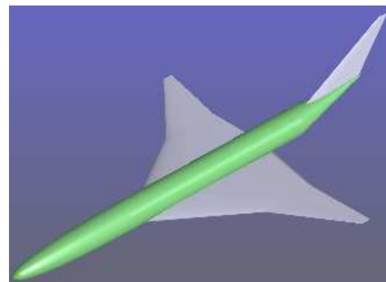




Max (Range)

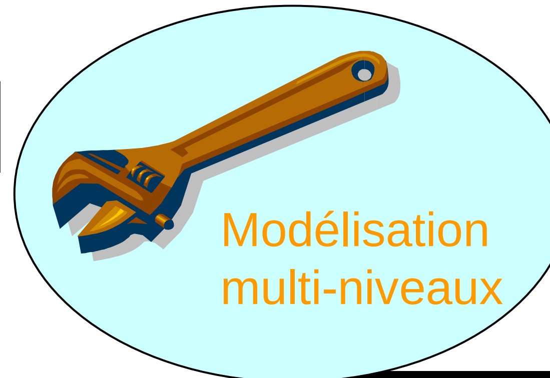
Sous contraintes :
- Capacité PAX
- Encombrement
- Distance décollage

# La pose de problème

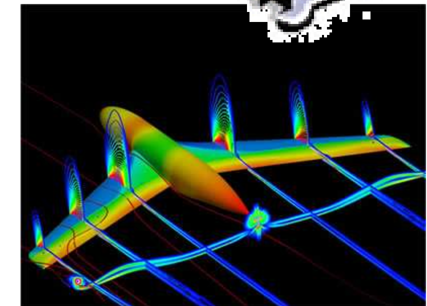
- Modèles : granularité, automatisation

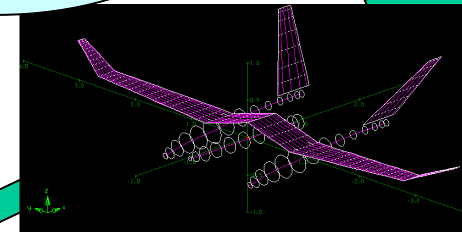


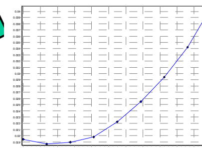
S, λ, $V_{interne}$



Modélisation multi-niveaux







Propulsion

Contrôle

MCI

Aero

Acoustique

Perfo

Max (Range)

Sous contraintes :
- Capacité PAX
- Encombrement
- Distance décollage

# La pose de problème



- Flux de données : séquencement, couplages

$S, \lambda, V_{interne}$

Propulsion

MCI

Aero

Perfo

Calcul objectifs et contraintes

Max (Range)

Sous contraintes :
- Capacité PAX
- Encombrement
- Distance décollage

# Le traitement du problème



- Décomposition du problème : choix d'une formulation

S, λ, $V_{interne}$

Propulsion

MCI

Aero

Perfo

Algorithme d'optimisation

Algorithme d'optimisation

Formulation MDO

Algorithmes d'optimisation

Max (Range)

Sous contraintes :
- Capacité PAX
- Encombrement
- Distance décollage



ONERA

# Le traitement du problème



- Maîtrise de la connaissance et des temps de calcul

$S, \lambda, V_{interne}$

Algorithme d'optimisation

Propulsion

MCI

Aero

Incertitudes

Réduction de modèle

coefficient de traînée - EcartRelatif (Cl = 0.8)

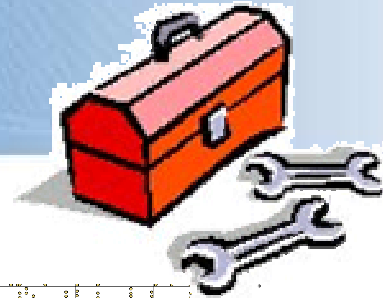
Max (Range)

Sous contraintes :
- Capacité PAX
- Encombrement
- Distance décollage



ONERA

# Le traitement du problème



- Visualisation, capitalisation

$V_{interne}$

Données de grande dimension

Propulsion

MCI

Aero

Perfo

Visualisation

Environnement MDO

Max (Range)

Sous contraintes :
- Capacité PAX
- Encombrement
- Distance décollage



ONERA

# Enjeux et illustrations

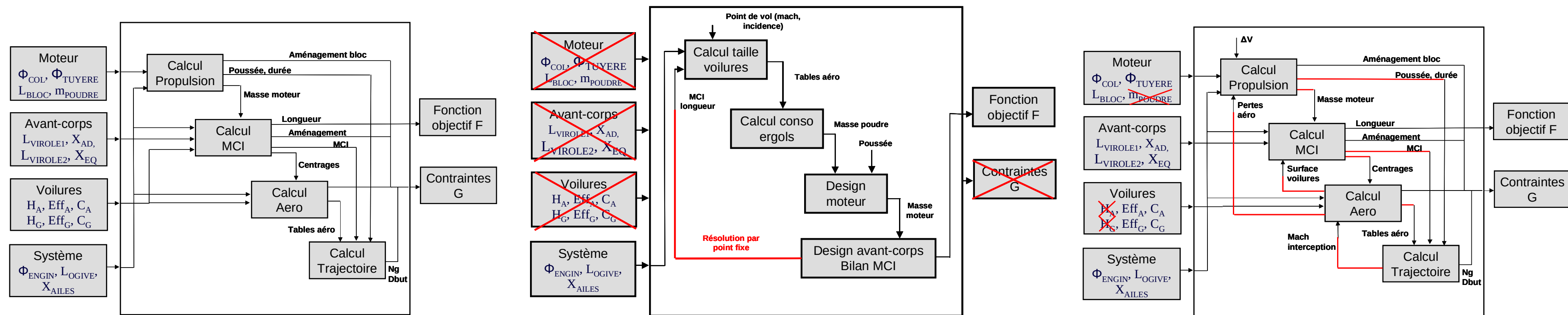
- Objectifs : enrichir la "boite à outils" et le "mode d'emploi"

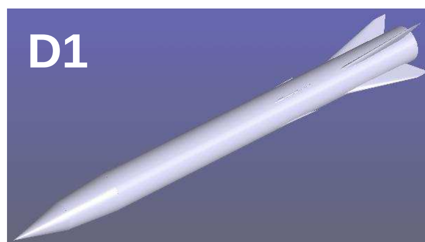


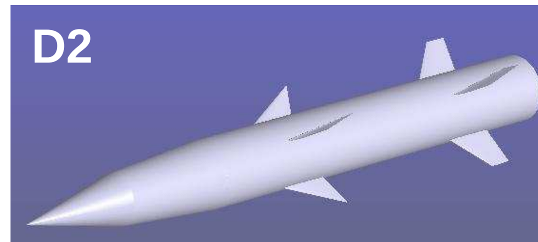
# Amélioration du processus

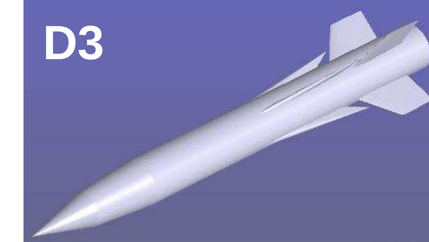
- Un exemple Onera : processus de conception missile



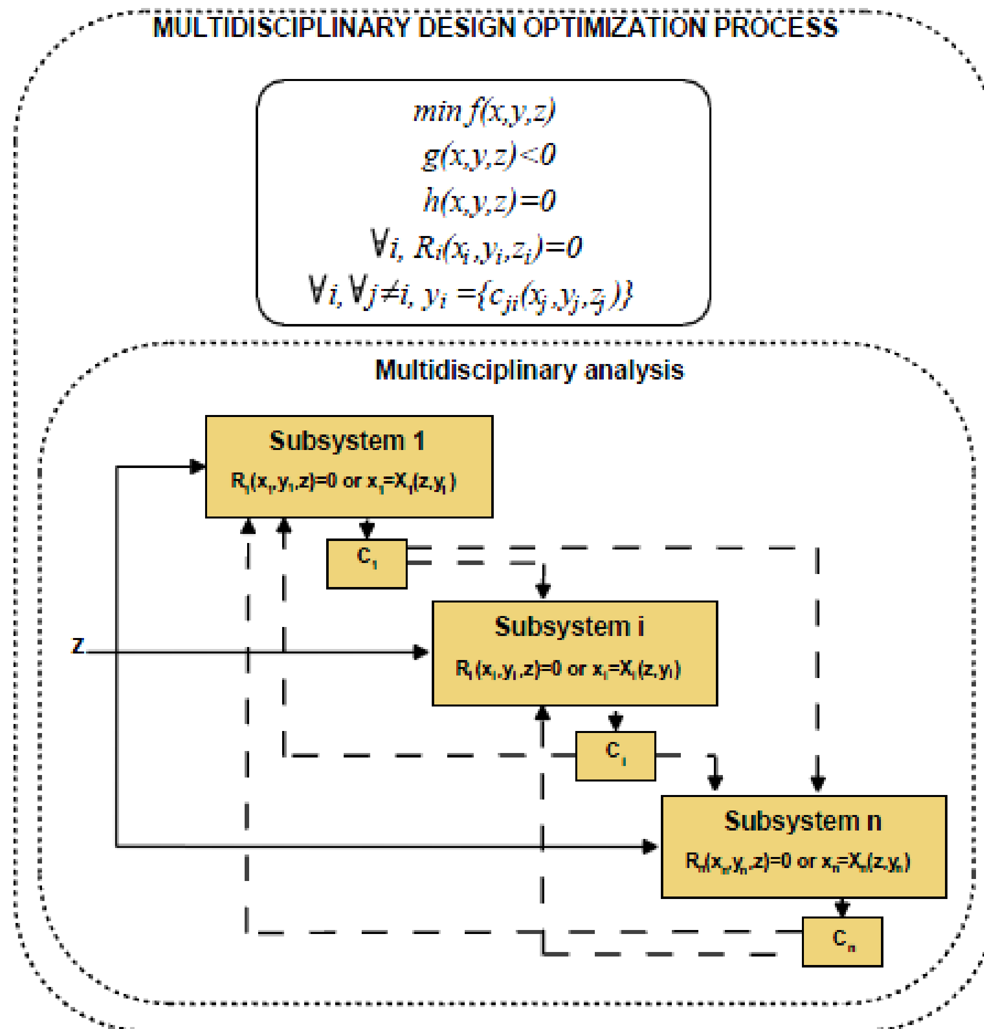



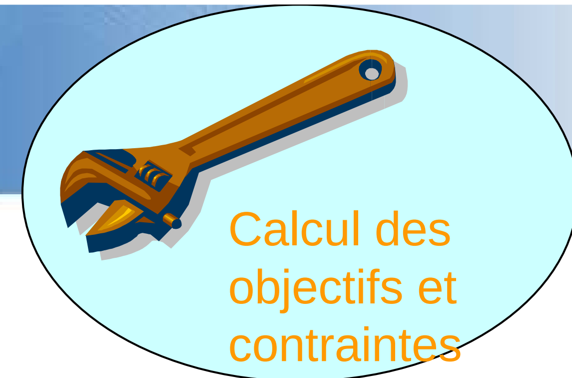



ONERA

# Amélioration du processus

- Adoption d'un formalisme standardisé




Z : Variables de design

Y : Variables de couplage

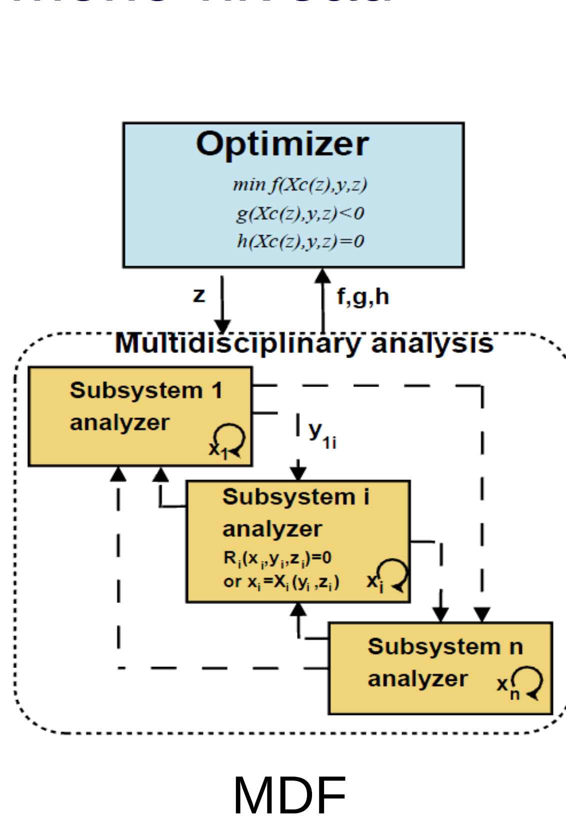
X : Variables disciplinaires (ou d'état)


ONERA

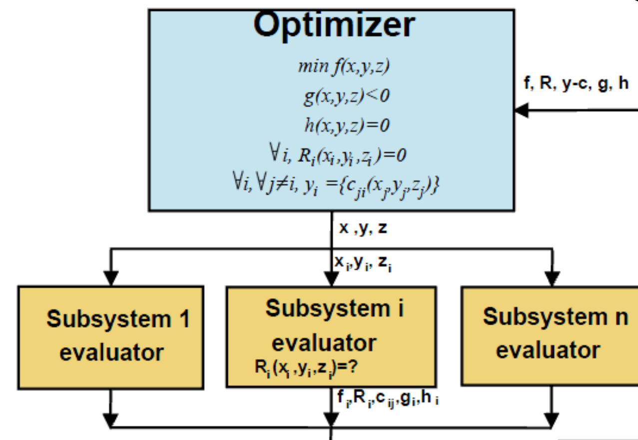
# Amélioration du processus



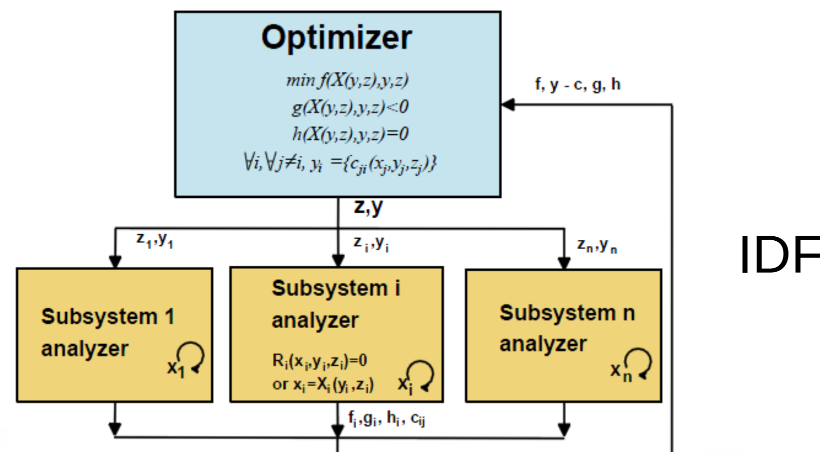

- Formulations MDO classiques : mono-niveau




MDF




AAO




IDF



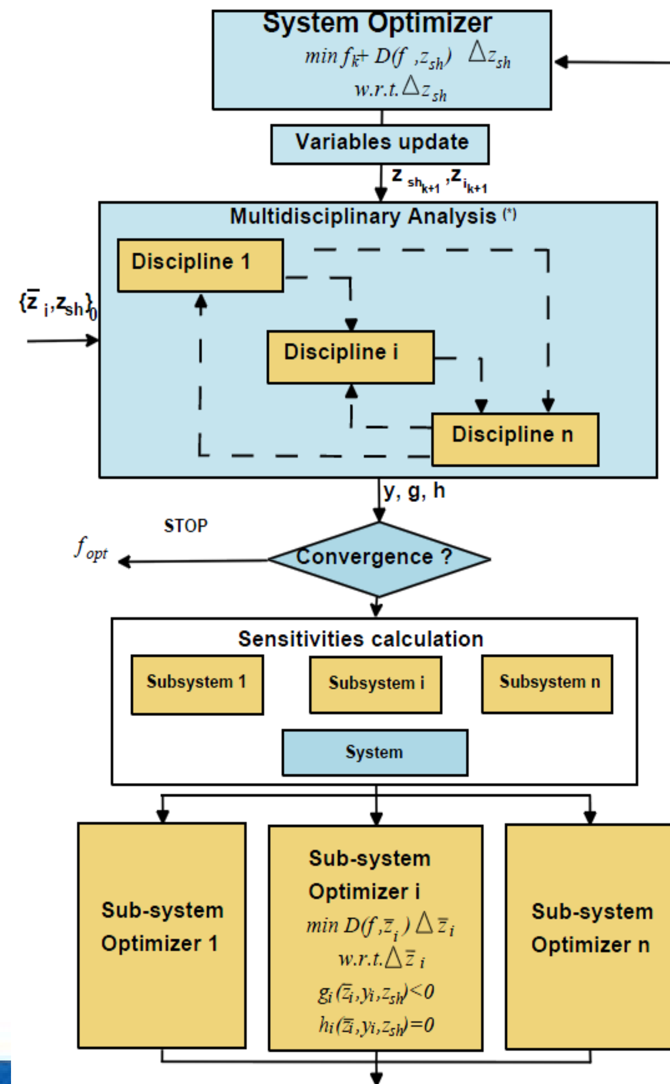
ONERA

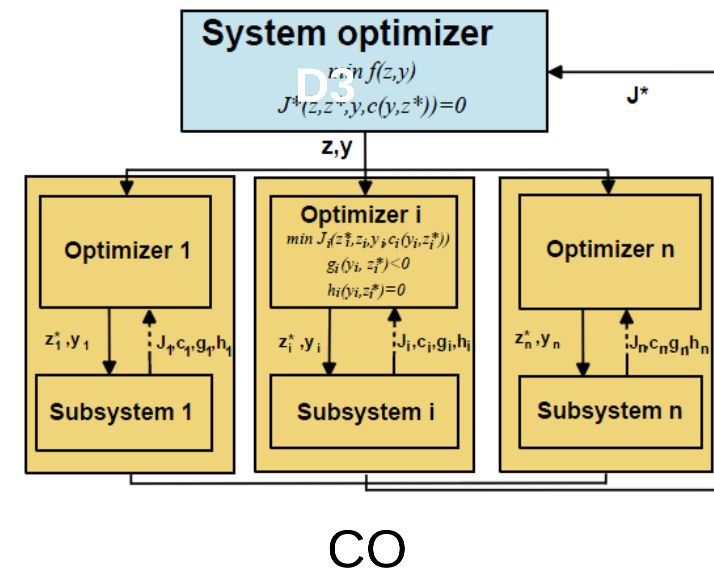
# Amélioration du processus




- Formulations MDO classiques : bi-niveau

BLISS




CO



ONERA

# Amélioration du processus

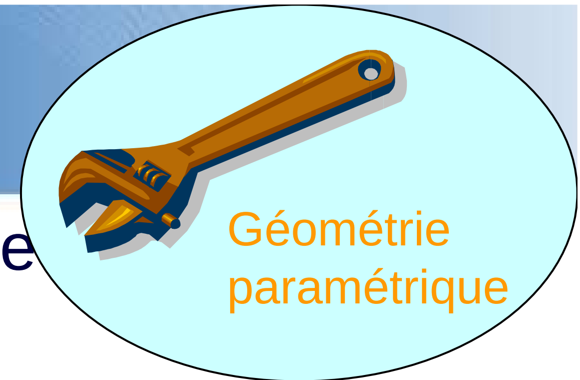



- Résumé de l'état de l'art :
  - Les formulations "classiques" sont assimilées et intensivement comparées dans la littérature
  - De nombreuses variantes et approches innovantes voient le jour
  - Les cas test restent très souvent à un niveau académique

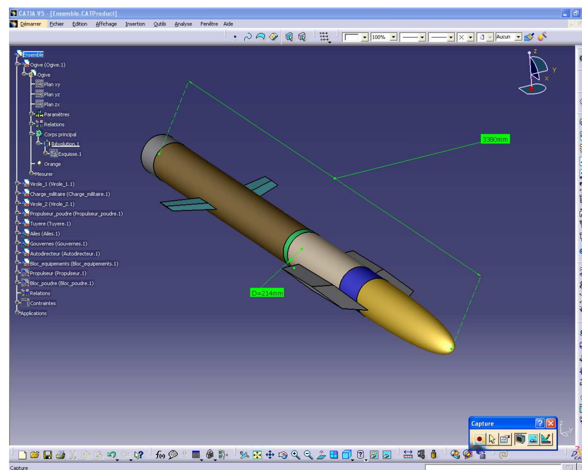
- Travaux Onera :
  - Comparaison de formulations sur cas test SSBJ (Thèse J. Clément)
  - Formulations MDO adaptées à la conception de lanceurs (Thèse M. Balesdent)
  - Mise en place de BLISS sur un cas de conception avion haute fidélité

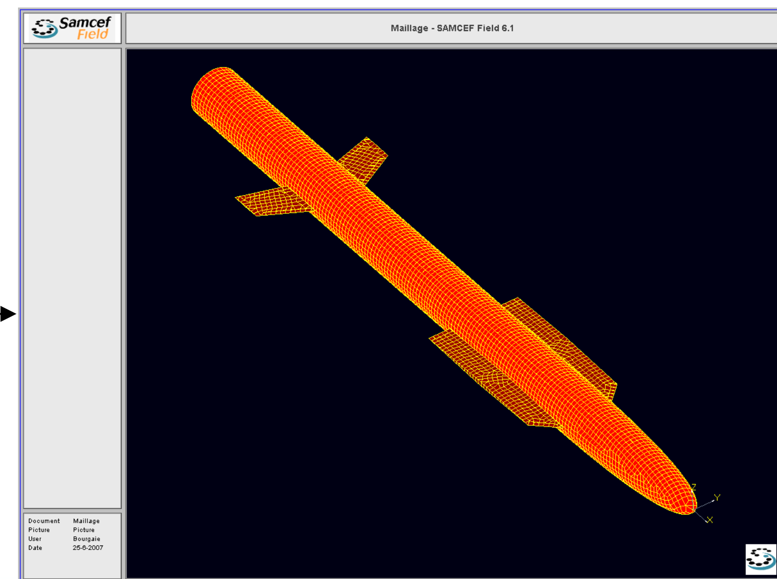
- Enjeux :
  - Maîtrise de la convergence consistante et robuste
  - Minimisation des temps de calcul : mariage avec les techniques RSM
  - Capacité à explorer l'espace de design et à trouver un optimum global

# Vers l'intégration de modèles fins




- Manipulation d'une géométrie paramétrique
  - Exemple : utilisation d'un logiciel de CAO
  - Introduction du paramétrage dès la conception de la forme
  - Extraction automatique des mesures de volume, surface, masse,…
  - Interfaçage avec des environnements de conception (ex. ModelCenter)
  - Interfaçage avec un mailleur – techniques de maillage
- Exemple :

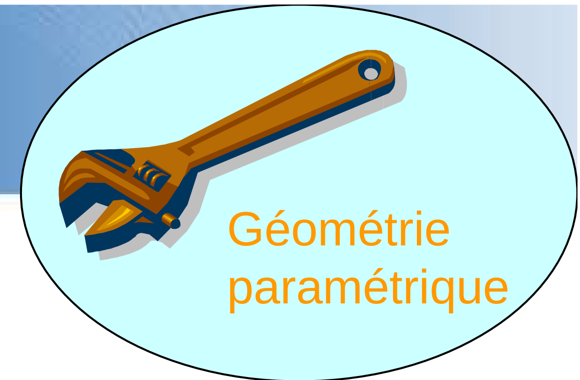






ONERA

# Vers l'intégration de modèles fins

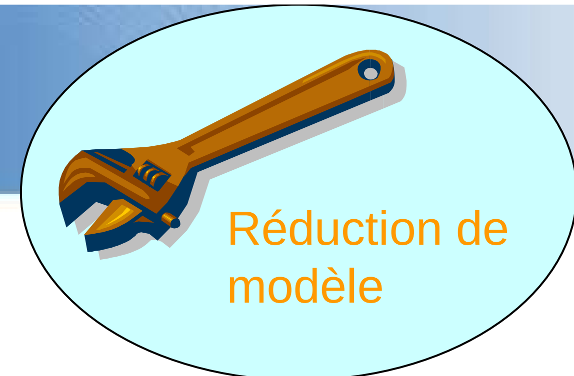



- Résumé de l'état de l'art :
  - Approche "prototype virtuel" mature dans le monde industriel
  - Développement des outils de CAO vers un paramétrage systématique
  - Technique maîtrisée si le nombre de paramètres reste faible et la topologie figée

- Travaux Onera :
  - Paramétrisation CAO de formes complexes et couplage avec des outils de dimensionnement
  - Paramétrisation et maillage automatisé de configurations pour le calcul aérodynamique, de structure, de combustion

- Enjeux :
  - Couplage direct de la géométrie détaillée paramétrée dans le processus de conception
  - Séléction des variables de conception adaptées en fonction du niveau de modélisation
  - Résolution des difficultés liées aux maillages automatisés ou déformables pour l'exploration de l'espace de design.

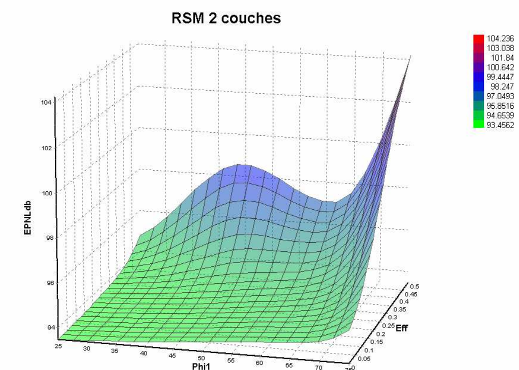
# Vers l'intégration de modèles fins




- Principe de la réduction de modèles
  - Evaluation coûteuse d'un code de calcul $y=f_{ex}(x)$
    - Construction d'un modèle réduit (non physique) à partir d'une base de données $(x_i, y_i)$ avec $y_i=f_{ex}(x_i)$
    - Expression analytique $f_{app}(x)$
    - Accès au gradient facile et rapide

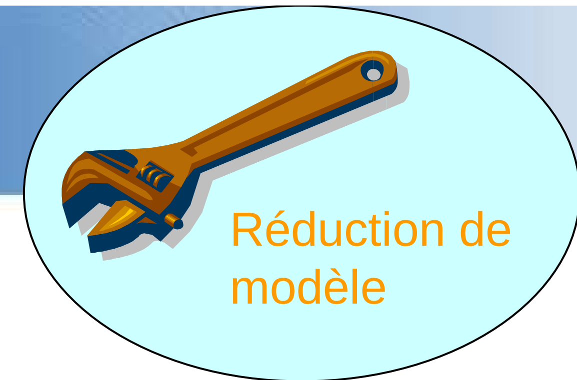
$$f_{app}(x) = \underbrace{\sum_{j=1}^{N_h} w_j h_j(\theta, x)}_{\text{régression}} + \underbrace{z(x)}_{\text{corrélation}}$$

  - Plusieurs familles selon les choix faits pour h et z
    - Réseaux de neurones
    - Radial Basis Function (RBF)
    - Kriging
    - SVM, Polynômes, ondelettes,...

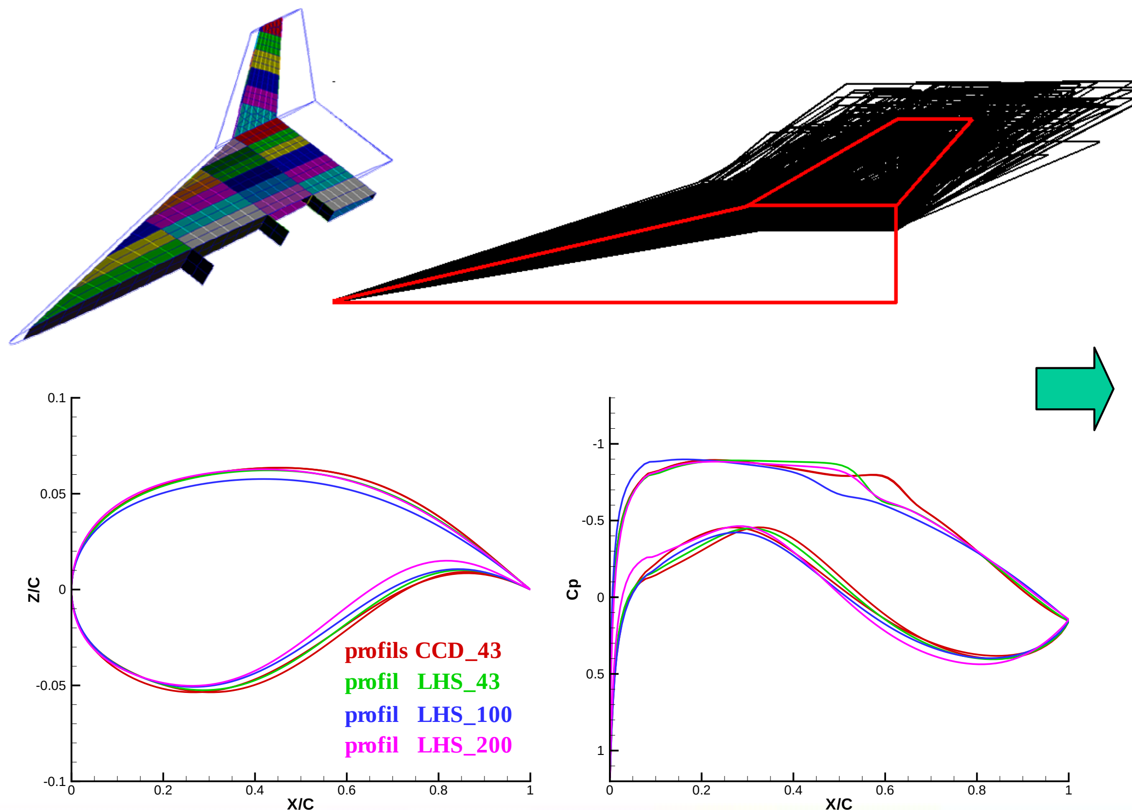


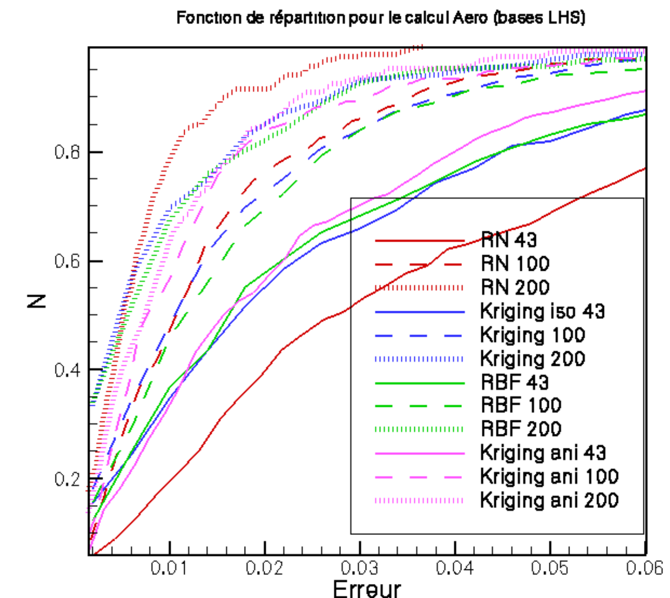

→ Résolution d'un problème de minimisation pour déterminer les paramètres $(w, \theta)$

# Vers l'intégration de modèles fins



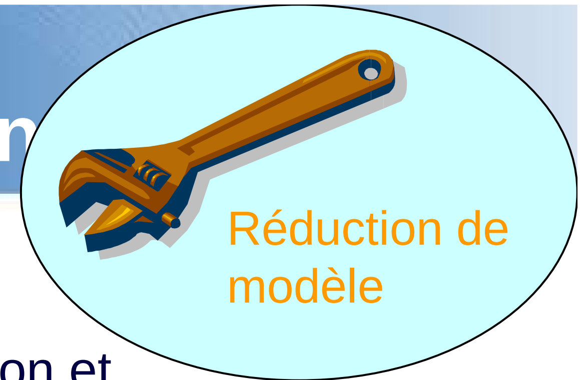

- Application dans un contexte MDO
  - Test de plusieurs méthodes : RN, krigeage, RBF
  - Sur 2 physiques différents (aéro, structure)
  - Sur des échantillons de même taille




**Calcul d'erreur du modèle réduit**

# Vers l'intégration de modèles fin

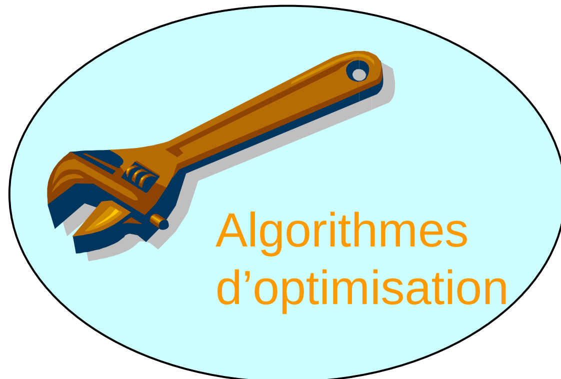



- Résumé de l'état de l'art :
  - Une communauté scientifique extrêmement active sur cette thématique : plans d'expérience, construction et validation, modèles de substitution, applications industrielles
  - Une transposition dans le monde de la MDO encore à systématiser

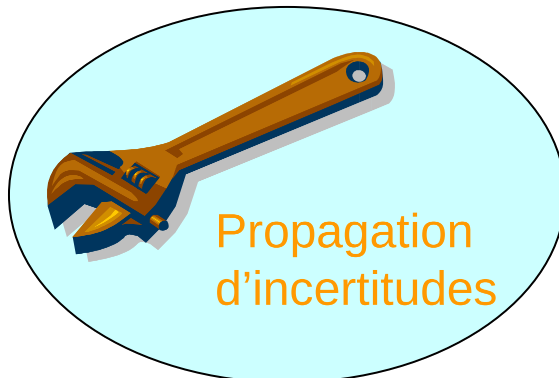
- Travaux Onera :
  - Comparaison de méthodes pour utilisation dans un contexte de MDO
  - Développement et capitalisation de méthodes : POLINOMES
  - Utilisation au sein de la formulation BLISS
  - Métamodèles robustes pour l'optimisation multidisciplinaire

- Enjeux :
  - Critères de choix des méthodes en fonction des physiques en jeu
  - Règlage des paramètres pour validité sur toute la plage de design
  - Utilisation en substitution ou enrichi au cours de l'optimisation

# Outils d'exploration de l'espace de design




- Enjeux :
  - Algorithmes gradient ou d'ordre zéro selon le problème posé ; combinaison pour favoriser l'exploration
  - Possibilité d'exploiter le gradient fourni par tout ou partie du modèle




- Enjeux
  - Prise en compte des incertitudes des modèles
  - Propagation au travers de la chaîne multidisciplinaire
  - Utilisation de l'information pour le multi-niveau et la conception robuste

# Etat d'applicabilité des méthodes

- Thématiques en jeu (rappel) :
  - Analyse et approximation
  - Formulation et optimisation
  - Intégration de processus
  - Implémentation industrielle
- Notation des techniques (~ TRL) :
  - Evaluation d'un niveau de diffusion moyen des différentes techniques
  - Vue partielle : destiné à servir de base de discussion

| Barème | |
|---|---|
| 0 | Pas du tout abordé |
| 1 | Abordé de façon empirique dans les études |
| 2 | Bibliographie scientifique/méthodologique établie |
| 3 | Implémentation sur cas académiques |
| 4 | Implémentation sur un cas complexe |
| 5 | Maîtrise de la méthode à un niveau de généralité suffisant |

# Etat d'applicabilité des méthodes

- Analyse et aproximation

| Item | Enjeux |
|---|---|
| **Analyse et approximation** | |
| Intégration de codes fins (CFD/FEM) | Pouvoir utiliser des codes CFD/FEM dans une boucle d'optimisation avec suffisamment de robustesse (paramétrisation, automatisation de maillage, gestion des erreurs, domaine de validité,…) |
| Techniques de réduction de modèle dans un contexte MDO | Réduire le coût d'appel à des codes complexes par une modélisation physique et/ou statistique réduite rendant compte des évolutions du phénomène original |
| Modélisation multi-niveaux | Disposer de codes de différentes granularités en fonction de l'étape de conception et/ou de la sensibilité du résultat à la discipline considérée. |
| Géométrie paramétrée | Savoir choisir un principe de paramétrage garantissant l'exploration de la famille de formes souhaitées et dont la finesse est adapté au niveau de modélisation |



ONERA

# Etat d'applicabilité des méthodes

- Formulation et optimisation

| **Formulation et optimisation** | |
|---|---|
| Objectifs et contraintes | Formuler le problème d'optimisation en terme d'objectifs et contraintes, construire la MDA permettant de les obtenir |
| Décomposition du processus | Utilisation de formulations MDO pour décomposer la démarche d'optimisation en conservant la consistance système et en réduisant les itérations |
| Stratégie d'optimisation | Intégrer les ingrédients de la MDO (formulation, algorithmes, usage de RSM, multi-niveaux) dans une stratégie globale de traitement du problème |
| Sensibilité et incertitudes | Prendre en compte dans le processus de conception les dispersions de fabrication, les incertitudes de modélisation, les variations de spécification,…dans la recherche d'une solution robuste |

# Etat d'applicabilité des méthodes

- Intégration de processus

| Intégration de processus | |
|---|---|
| Environnement MDO, boîte à outils | Disposer d'un environnement de couplage de modèles et de bibliothèques d'outils, capitaliser les nouveaux développements, généraliser l'utilisation |
| Infrastructure informatique distribuée | Disposer de moyens d'échange de données/modèles réunissant les acteurs du processus de conception |
| BDD, formats d'échange | Rationaliser les données collectées lors d'une ou plusieurs études, disposer de formats type d'échange ou de paramétrisation |
| Visualisation de l'espace de design | Disposer d'outils de tri et d'analyse de données de grande dimension, extraction de critères pertinents d'aide à la décision |

# Etat d'applicabilité des méthodes

- Intégration de processus

| **Implémentation industrielle** | |
|---|---|
| Découpage organisationnel | Impliquer chaque entité de la structure organisationnelle dans le développement et l'utilisation du processus MDO |
| Système d'information projet | Mise en œuvre d'un moyen partagé de suivi du processus de conception : état de développement des modèles, partage de la boucle MDO, distribution d'études paramétriques, échange de recommandations… |
| Evaluation des coûts et gains | Savoir quantifier les gains apportés par l'utilisation de techniques MDO (en particulier "retour sur investissement": rapport entre difficulté de développement process et réduction des cycles de design) |
| Déploiement, formation | Former les différents intervenants du processus à l'approche MDO, déployer largement les outils associés |

# Etat d'applicabilité des méthodes

- Synthèse :
  - Par famille de thématiques

| Item | Pôles d'excellence | Moyenne état de l'art |
|---|---|---|
| **Analyse et approximation** | **3,5** | **1,5** |
| **Formulation et optimisation** | **3,5** | **1** |
| **Intégration de processus** | **3,5** | **2,25** |
| **Implémentation industrielle** | **1,875** | **0,75** |
| Moyenne | **3,09375** | **1,375** |

  - Quelques constations :
    - En moyenne, l'implémentation "industrielle" de techniques avancées dans le champ de la MDO reste relativement marginale
    - L'accent est en général mis sur l'implémentation de processus et la communication entre les acteurs
    - Au niveau le plus avancé, les méthodes MDO ont atteint un niveau intermédiaire entre l'implémentation sur des cas simplifiés (globalement maîtrisée) et la mise en œuvre sur des cas de niveau industriel (de nombreux travaux en cours)
    - La diffusion, l'appropriation par tous les acteurs et l'implémentation dans un cadre industriel nécessitent encore un effort conjoint industrie/recherche

# Conclusion et perspectives

- La conception et l'optimisation multidisciplinaires
  - Un ensemble de méthodes et d'outils prometteurs pour améliorer la réactivité et l'efficacité en phase d'étude amont
  - Une "science" théorique et expérimentale : un formalisme mathématique à adopter, un besoin d'expérimenter sur des cas concrets
- Un investissement de long terme pour l'Onera
  - Un effort méthodologique important pour s'approprier les différents concepts scientifiques sous-jacents
  - Une utilisation de plus en plus large, pour des domaines applicatifs variés (drones, missiles, avions, lanceurs,…)
- Vers l'application industrielle largement déployée
  - Un saut technologique reste à franchir pour une capacité intégrée
  - Nécessite l'implication de tous les acteurs de la recherche et de l'industrie